

фосфогипса, уточнение физико-механических свойств получаемых строительных материалов и изделий, расширение сырьевой базы с использованием как природного, так и техногенного сырья, разработку эффективных ресурсосберегающих конструктивных элементов и типов зданий.

## **ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ УСВОЕНИЯ КУСКОВ ТВЕРДЫХ ДОБАВОК ЖИДКОСТЬЮ**

А.С. НОСКОВ, д-р техн. наук, проф.,

А.В. НЕКРАСОВ, канд. техн. наук, доц., Н.В. СЛУЖЕНИКИНА

*Уральский государственный технический университет*

В статье рассматриваются процессы, происходящие при растворении или плавлении твердых добавок в случае высокотемпературных жидкостей (расплавов). Такого рода процессы используются во многих современных технологиях. Ограничимся случаем процессов происходящих в замкнутом пространстве, заполненном жидкостью (например, в резервуаре, реакторе, ковше). Такие процессы существенно отличаются от проточных, где жидкость имеет определенно направленное движение.

В большинстве технологиях предъявляются обычно следующие требования к процессу усвоения твердых добавок:

1. Добавки должны как можно быстрее растворяться (плавиться).
2. Растворившиеся примеси должны как можно более равномерно распределяться по объему жидкости и при необходимости вызывать прохождение вторичных взаимодействий (реакций).
3. В случае взаимодействия добавок с атмосферным воздухом (окисления) необходимо минимизировать время контакта твердой добавки с ним, т.е. время пребывания твердой частицы на свободной поверхности.

Эти три требования могут быть реализованы следующим образом:

1. Интенсификация тепломассообменных процессов путем изменения гидродинамических условий (рационализация поля и увеличение скорости движения жидкости).
2. Совершенствование способов ввода твердых добавок (изменение скорости, места и характера ввода).
3. Создание добавок с оптимальными физико-химическими свойствами, в первую очередь плотностью и температурой плавления (для растворения в высокотемпературных жидкостях).

Дальнейший конкретный анализ данной проблемы рассмотрим на примере широко используемой технологии обработки высокотемпературных расплавов твердыми добавками (в частности стали твердыми ферросплавами) в ковше.

Движение в расплаве в этом случае может быть организовано чаще всего при помощи:

1. Сливаемой в ковш струи расплава.
2. Продувкой расплава инертным газом.
3. Электромагнитным перемешиванием.

Каждый из этих способов создает свое поле скорости расплава, имеющего (ввиду замкнутости объема расплава) циркуляционный характер и численно характеризуется определенной скоростью расплава  $U_f$  ( задающей мощность перемешивания). Первый способ организации движения является неустановившимся (происходит наполнение ковша расплавом), но ввиду достаточно небольшой скорости подъема уровня расплава, его можно рассматривать стационарным за время цикла растворения отдельной частицы. Второй способ отличается созданием газожидкостной двухфазной среды. Очень важной характеристикой способа организации движения расплава является наличие достаточно большой скорости расплава для увлечения частиц с поверхности расплава в его глубь для ускорения усвоения и уменьшения окисления добавок воздухом атмосферы.

Способ ввода характеризуем углом ввода, величиной скорости  $U_p$ , координатами ввода ( $r_0$  - расстояние от оси ковша,  $h$  - глубина). Характеристики расплава:  $\rho$  - плотность,  $\nu$  - кинематический коэффициент вязкости  $T_b$  - температура расплава,  $T_k$  - температура кристаллизации расплава,  $\rho_2$  - плотность расплава в твердом состоянии (для учета процесса кристаллизации расплава по поверхности частицы). Будем считать, что добавка относится к группе легкоплавких, т.е. ее температура плавления ниже  $T_k$ . Динамические характеристики частицы:  $d$  - диаметр,  $\rho$  - плотность. Теплофизические характеристики комплексно описываются временем растворения  $\tau_0$  (временем плавления) в стандартных статических условиях. Геометрические размеры ковша:  $D$  - его диаметр и  $H$  - глубина заполнения расплавом.

Таким образом, процесс определяется 15 размерными параметрами (кроме перечисленных сюда надо добавить ускорение свободного падения). На основании  $\pi$ -теоремы из них можно составить 11 безразмерных параметров:

$$\begin{aligned} Fr &= \frac{U_f}{\sqrt{gd}} & Re &= \frac{U_f D}{\nu} & Fr_p &= \frac{U_p}{\sqrt{gd}} \\ \bar{d} &= \frac{d}{D} & \bar{h} &= \frac{h}{H} & \bar{r}_0 &= \frac{r_0}{d} & \bar{H} &= \frac{H}{D} \\ \bar{T}_b &= \frac{T_b}{T_n} & \bar{\rho}_2 &= \frac{\rho_2}{\rho} & \bar{\rho} &= \frac{\rho_1}{\rho} & \tau_0 &= \frac{\tau_0 \sqrt{gd}}{D} \end{aligned}$$

Ввиду того, что  $d \ll D$ , величину  $d$  можно исключить из этого списка. Малосущественным также можно считать отношение  $\rho_2$ . В развитых турбулентных течениях часто выполняется условие автомодельности по  $Re$ . Таким образом, остаются 8 основных критериев, из которых  $Fr$  выражает условие движения расплава, а  $Fr_p$  - условие ввода частицы в расплав.

Главным параметром, определяющим характер движения частицы, является ее относительная плотность  $\bar{\rho}$ . Если  $\bar{\rho} > 1$ , то такие куски (при достаточном размере) будут достигать дна ковша и медленно растворяться.

Частицы с  $\delta e < 1$  могут всплывать на поверхность. В этом случае важную роль играет наличие мест с высокой локальной вертикальной составляющей вектора скорости расплава. В этих местах возможно увлечение частицы вглубь расплава, например, при взаимодействии частицы со струей сливаемого расплава. При наличии таких мест и достаточном размере частицы, ее движение имеет циркуляционный характер: вглубь расплава, вверх к свободной поверхности, по свободной поверхности к месту с высокой локальной вертикальной составляющей вектора скорости расплава.

В зависимости от способа организации движения жидкости в ковше, от условий протекания тепломассообменных процессов и способов ввода кусков, возможны различные конкретные зависимости времени плавления от указанных выше безразмерных критериев.

На основе математической модели для ковшевой обработки стали кусковыми ферросплавами выделены 5 групп ферросплавов:

1. Очень тяжелые, с  $\delta e > 1$ . Куски падают на дно, где располагаются практически неподвижно.
2. Тяжелые, с  $0.85 < \delta e < 1$ . Эти сплавы отличаются тем, что за счет намерзания корки расплава на кусок, их эффективная плотность увеличивается, и они очень глубоко проникают в расплав и даже могут достигнуть дна ковша.
3. Средние, с  $0.7 < \delta e < 0.85$ .
4. Легкие, с  $0.5 < \delta e < 0.7$ .

Сплавы 2 и 3 групп ведут себя качественно одинаково, но средние сплавы более глубоко проникают в расплав.

5. Очень легкие, с  $\delta e < 0.5$ . После ввода, куски этих сплавов практически не проникают в расплав и большую часть времени находятся на свободной поверхности расплава.
6. Для разработки эффективных способов ввода и организации движения расплава подобного типа, необходимо провести анализ процессов в широком диапазоне изменения параметров путем математического моделирования.